

PACS: 07.55.Db, 84.32.Nh, 84.40.Ik, 84.71.Ba, 84.71.Mn

Д.О. Федюк, Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник

СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 1 июня 2018 года

Описана сверхпроводниковая магнитная система для создания сильного магнитного поля с высокой однородностью для спектрометров электронного парамагнитного (ЭПР) и ядерного магнитного (ЯМР) резонанса. Приведены методика расчета и конструкция обмоток, которая позволяет осуществить индуктивную развязку с короткозамкнутым соленоидом. Представлено соотношение длин катушек для обмоток квадратичного градиента и обмоток развертки. Исследования на магнитной системе для спектрометра ЭПР показали, что коэффициент индуктивной связи обмотки развертки с короткозамкнутой обмоткой соленоида составил $3 \cdot 10^{-3}$, что привело к изменению тока соленоида на 0.012 А при величине поля развертки 0.1 Т. Коэффициент связи обмотки квадратичного градиента d^2H/dz^2 с обмоткой развертки составил не более 10^{-2} . При токе коррекции однородности поля соленоида 9 А индуктивно наведенный ток в короткозамкнутой обмотке d^2H/dz^2 не превышал 0.2 А.

Ключевые слова: сверхпроводниковый соленоид, магнитное поле, обмотки компенсации неоднородности поля, обмотка развертки поля, индуктивная связь, однородность поля

Сильные магнитные поля с высокой однородностью для спектрометров ЭПР и ЯМР получают с помощью сверхпроводниковых соленоидов. Методика расчета однородных соленоидов описана в работе [1], в которой используются методы суперпозиции и разложения магнитного поля в степенной ряд по полиномам Лежандра. В качестве корректирующего элемента для повышения однородности магнитного поля применяют поперечную щель, внутренний или наружный паз в обмотке соленоида либо их комбинацию. Такую коррекцию однородности поля называют пассивной.

Однородность магнитного поля соленоида вследствие различных факторов (погрешности в изготовлении, влияния намагниченности материала обмотки, изменения ее размеров при охлаждении до гелиевой температуры, действия пондеромоторных сил и пр.) существенно ниже расчетного значения и, как правило, находится на уровне $1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ Ое в объеме 1 см^3 .

Для повышения однородности магнитного поля соленоида используют сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых dH/dz , d^2H/dz^2 и ради-

альных dH/dx , dH/dy , $d^2H/dzdx$ и $d^2H/dzdy$ градиентов поля [2,3]. Обмотка градиента поля dH/dz выполнена в виде пары встречно-включенных цилиндрических катушек, соосных соленоиду. Градиенты поля dH/dx и dH/dy создаются с помощью четырех седлообразных встречно-включенных катушек, форма которых представляет собой две дуги длиной в четверть окружности, соединенные прямыми проводниками, расположенными параллельно оси соленоида. Градиенты поля $d^2H/dzdx$ и $d^2H/dzdy$ создаются двумя седлообразными, встречно-включенными катушками. Все обмотки градиентов поля располагаются симметрично медианной плоскости соленоида. Выполнение обмоток градиентов магнитного поля со встречным включением катушек обеспечивает их нулевую индуктивную связь с соленоидом, и введение в них токов не влияет на абсолютную величину поля соленоида.

Обмотка осевого квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 выполняется в виде трех пар цилиндрических катушек, при этом пара внутренних катушек включена встречно двум парам внешних катушек, что обеспечивает равенство нулю постоянной составляющей магнитного поля и следующего четного градиента d^4H/dz^4 . Обмотка градиента d^2H/dz^2 имеет индуктивную связь с соленоидом, и при вводе в нее тока для повышения однородности соленоида абсолютная величина поля последнего изменяется за счет возбуждения в нем дополнительного тока индуктивным путем, что не всегда приемлемо при проведении прецизионных измерений.

Наряду с использованием обмоток компенсации градиентов для повышения однородности магнитного поля в таких соленоидах для спектрометров ЭПР и ЯМР применяют дополнительные сверхпроводниковые обмотки развертки и модуляции магнитного поля [4]. Амплитуда поля развертки достигает ± 0.1 Т, а поля модуляции – ± 0.05 Т. На практике такие обмотки объединены в одну, и в нее одновременно вводят медленно нарастающий постоянный ток той или иной полярности поля развертки и переменный ток поля модуляции. Для обеспечения высокой эффективности ввода этих полей в короткозамкнутый соленоид обмотку развертки (модуляции) размещают в отверстии соленоида. Индуктивная связь этой обмотки с соленоидом отлична от нуля, поэтому она, как и обмотка градиента поля d^2H/dz^2 , изменяет абсолютную величину магнитного поля соленоида. Кроме того, обмотка развертки поля имеет индуктивную связь и с обмоткой градиента поля d^2H/dz^2 , что приводит к ухудшению ранее достигнутой высокой однородности магнитного поля соленоида вследствие индуцирования в обмотке градиента поля d^2H/dz^2 дополнительного тока.

В настоящей работе описана конструкция сверхпроводниковой магнитной системы, предназначенной для возбуждения сильного магнитного поля высокой однородности. Система состоит из соленоида, обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов и обмотки развертки поля, которая имеет нулевую индуктивную связь как с соленоидом, так и с обмоткой квадратичного градиента d^2H/dz^2 , т.е. эти обмотки индуктивно развязаны.

Индуктивная развязка обмоток означает, что взаимная индуктивность между соленоидом и обмоткой развертки поля, а также между обмоткой осевого квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 и обмоткой развертки равна нулю.

Выражение для расчета взаимной индуктивности двух цилиндрических обмоток с общей осью симметрии имеет вид [5]:

$$M = Kf(L/a_1, l/a_1), \quad (1)$$

где $K = \pi\mu_0 n_1 n_2 a_1 a_2$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$ Н/м – универсальная магнитная постоянная, a_1, a_2 – радиусы обмоток, n_1, n_2 – линейная плотность витков в обмотках); L, l – длины обмоток.

Функция $f(L/a_2, l/a_2)$ в общем виде определяется как

$$f(y_1, y_2) = \varphi(y_1 + y_2) - \varphi(y_1 - y_2), \quad (2)$$

при этом $\varphi(y) = \sqrt{1 + y^2}$.

Условие индуктивной развязки двух обмоток означает, что

$$M = K\Delta f(L/a_2, l/a_2) = 0. \quad (3)$$

Индуктивная развязка соленоида и обмотки развертки магнитного поля обеспечивается тем, что часть этой обмотки включена встречно другой ее части. Так, в случае, если обмотка развертки поля состоит из трех катушек (одной средней и двух крайних, которые включены встречно средней), условие (3) выполняется, когда

$$\Delta f = f(L/a_2, l/a_1) - f(L/a_2, l_2/a_1) + f(L/a_2, l_1/a_1) - \frac{1}{4}f(L/a_2, l_3/a_1) = 0. \quad (4)$$

На рисунке приведена в разрезе сверхпроводниковая магнитная система, которая состоит из соленоида, обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов и обмотки развертки магнитного поля.

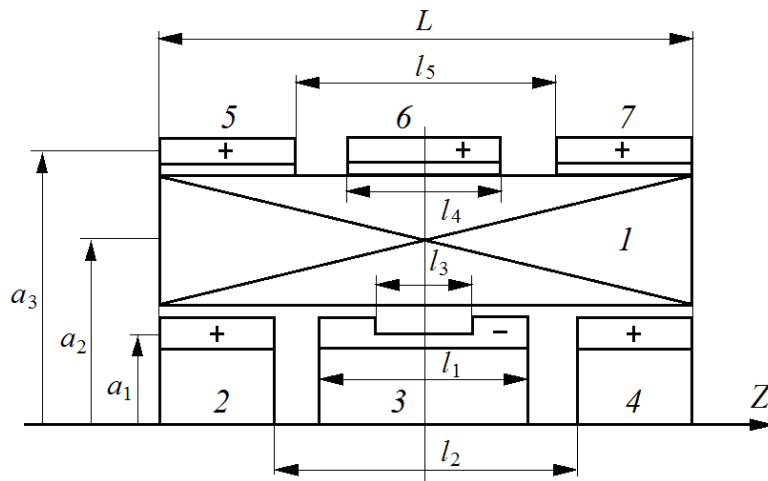


Рис. Сверхпроводниковая магнитная система: 1 – соленоид, 2–4 – обмотки развертки поля, 5–7 – обмотки градиента поля d^2H/dz^2

Задаваясь общей длиной сверхпроводниковой магнитной системы L и радиусами обмоток a_1 и a_2 , определяют длины обмоток развертки поля (2–4): общую длину l , длину обмотки средней катушки l_1 , зазор между обмотками крайних катушек l_2 и длину корректирующего наружного паза l_3 , выполненного в средней катушке. При этом длина обмотки средней катушки в два раза больше длины обмоток крайних, чтобы числа витков обмоток средней и двух крайних катушек были равны.

Так, для магнитной системы длиной $L = 300$ mm при среднем диаметре соленоида $2a_2 = 135$ mm размеры обмотки развертки магнитного поля, состоящей из трех катушек (из которых средняя включена встречно крайним и имеет с соленоидом нулевую индуктивную связь), будут следующими: $l_1 = 110$ mm, длина обмоток крайних катушек – по 55 mm, зазор между ними $l_2 = 190$ mm, длина наружного паза в средней катушке $l_3 = 42$ mm, средний радиус $a_1 = 71$ mm.

Аналогично определяют размеры обмоток квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 согласно-включенных катушек (5–7), имеющих нулевую индуктивную связь с обмотками развертки магнитного поля: длину обмотки средней катушки l_4 , зазор между крайними катушками l_5 и средний радиус a_3 . Необходимо отметить, что длина обмотки средней катушки градиента поля d^2H/dz^2 в два раза меньше длины обмотки средней катушки обмотки развертки, а длина обмоток крайних катушек этого градиента равна 0.9 длины обмоток крайних катушек обмотки развертки поля. Обмотка квадратичного градиента поля, как правило, располагается снаружи соленоида.

Экспериментальные исследования предложенного решения по индуктивной развязке короткозамкнутых обмотки соленоида, обмотки компенсации квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 и обмотки развертки магнитного поля проводили на сверхпроводниковой магнитной системе спектрометра ЭПР [6]. Сверхпроводниковый соленоид имел диаметр внутреннего отверстия 43 mm, наружный диаметр 142 mm, длину 190 mm и создавал магнитное поле до 7.5 Т с однородностью $3 \cdot 10^{-5}$ Ое в объеме ампулы диаметром и длиной 5 mm. Для повышения однородности магнитного поля до 10^{-6} Ое использовали сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых dH/dz , d^2H/dz^2 и радиальных dH/dx , dH/dy градиентов поля, которые располагали снаружи соленоида. Обмотки градиентов поля dH/dz , dH/dx и dH/dy выполнены согласно [2]. Обмотка квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 состоит из трех однослойных согласно-включенных катушек: длина средней равна 34.5 mm, длина крайних – по 32 mm, общая длина 190 mm, а средний диаметр 144 mm. Все обмотки градиентов поля изготовлены из сверхпроводника сплава НТ-50 диаметром 0.38 mm и закорочены ключами.

Сверхпроводниковая обмотка развертки магнитного поля намотана на отдельном каркасе и расположена в отверстии соленоида. Она состоит из обмоток трех катушек – основной средней и двух крайних, включенных встречно средней. Внутренний диаметр обмотки 35 mm, наружный – 39.6 mm, длина

обмотки средней катушки 66.8 mm, длина обмоток крайних – по 34.4 mm, зазор между средней и крайними катушками 27.7 mm. Для обеспечения высокой однородности поля развертки средняя обмотка содержит внутренний корректирующий паз длиной 36 mm и высотой в два слоя обмотки. Обмотка намотана сверхпроводниковым проводом диаметром 0.33 mm.

Исследования проводили в магнитном поле соленоида с индукцией 6 Т. Для измерения величины и однородности магнитного поля использовали тесламетр ЯМР [7]. После включения обмоток компенсации градиентов поля однородность поля в объеме рабочей ампулы диаметром 5 mm с тяжелой водой D₂O была улучшена до $2 \cdot 10^{-6}$ Ое. Коэффициент индуктивной связи обмотки развертки магнитного поля с короткозамкнутой обмоткой соленоида составил менее $3 \cdot 10^{-3}$, что привело к изменению тока в соленоиде не более чем на 0.012 А при величине поля развертки 0.1 Т («замороженный» ток в соленоиде равен 40 А). Коэффициент индуктивной связи обмотки развертки поля с обмоткой квадратичного градиента d^2H/dz^2 составил менее 10^{-3} , а величина индуктивно наведенного тока в этой обмотке – не более 0.2 А, что не повлияло на ранее достигнутую высокую однородность магнитного поля соленоида («замороженный» в обмотке d^2H/dz^2 ток коррекции был равен 9 А). Собственная неоднородность поля развертки величиной 0.1 Т была на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ Ое, а ее влияние на однородность магнитного поля соленоида составило: $1 \cdot 10^{-4} \times 0.1 \text{ Т} / 6 \text{ Т} = 1.7 \cdot 10^{-6}$ Ое в объеме рабочей ампулы.

Выводы

1. Разработанная методика расчета сверхпроводниковой магнитной системы с однородным магнитным полем, состоящей из соленоида, обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов и обмотки развертки поля, позволяет определять конструкцию и соотношение размеров обмотки квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 и обмотки развертки поля, которые обеспечивают индуктивную развязку обмотки развертки с короткозамкнутым соленоидом и обмоткой d^2H/dz^2 .

Обмотка квадратичного градиента поля выполнена в виде трех однослойных согласно-включенных катушек, а обмотка развертки – также в виде трех катушек, однако средняя катушка включена встречно крайним. Приведено также соотношение длин обмоток этих катушек.

2. Экспериментальные исследования на магнитной системе для спектрометра ЭПР показали, что коэффициент индуктивной связи обмотки развертки с короткозамкнутой обмоткой соленоида составил менее $3 \cdot 10^{-3}$, что привело к изменению тока в соленоиде менее чем на 0.012 А (ток в соленоиде равен 40 А, а амплитуда поля развертки 0.1 Т). Коэффициент связи обмотки квадратичного градиента d^2H/dz^2 с обмоткой развертки составил не более 10^{-2} . При токе коррекции однородности поля соленоида 9 А индуктивно наведенный ток в короткозамкнутой обмотке d^2H/dz^2 не превышал 0.2 А.

1. Д. Монтомери, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).
2. В.Б. Назаров, В.А. Забродин, И.С. Краинский, Л.И. Гальперин, ПТЭ № 5, 208 (1971).
3. В.А. Забродин, И.С. Краинский, В.Б. Назаров, Л.И. Гальперин, ПТЭ № 1, 220 (1973).
4. В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, Н.В. Таряник, В.В. Сухой, В.В. Шапаренко, ПТЭ № 6, (1982).
5. В.В. Сухой, В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, А.О. Тимошенко, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика вып. 3(17), с. 50–55 (1981).
6. Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк, ФТВД 27, № 2, 98 (2017).
7. А.А. Глуценко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).

D.O. Feduk, D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik

SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEM CHARACTERIZED BY HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD

A superconducting magnetic system is described that forms strong magnetic field characterized by high homogeneity that can be used in spectrometers of electron paramagnetic resonance (EPR) and nuclear magnetic resonance (NMR). The method of calculation and the design of the coils providing an inductive uncoupler with a short-circuited solenoid are presented. The ratio of the coil lengths for the quadratic gradient and the sweep is found. The tests of the magnetic system of an EPR spectrometer have demonstrated that the coefficient of the inductive coupling of the sweep coil and the short-circuited coil of the solenoid is $3 \cdot 10^{-3}$. This fact resulted in the change of the solenoid current by 0.012 A at the sweeping field of 0.1 T. The coefficient of coupling of the quadratic gradient coil and the sweeping coil d^2H/dz^2 does not exceed 10^{-2} . When the current of correction of the filed homogeneity is 9 A, the induced current if the short-circuited coil d^2H/dz^2 does not exceed 0.2 A.

Keywords: superconducting solenoid, magnetic field, coils of compensation of the field inhomogeneity, field sweeping coil, inductive coupling, field homogeneity

Fig. Superconducting magnetic system: 1 – solenoid, 2–4 – coils of the field sweeping, 5–7 – coils of the filed gradient d^2H/dz^2